

# МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИОННОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ\*

Чукин М.В.

ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

Конструкционная прочность материалов играет важную роль в обеспечении надежной и долговечной работы деталей машин и агрегатов. Создание новых образцов техники в авиационной, машиностроительной, нефтегазодобывающей и других отраслях промышленности предъявляет более жесткие и повышенные требования к работоспособности конструкций. Это обуславливает необходимость применения материалов с более высоким комплексом физико-механических свойств. Для металлических материалов данная проблема решается либо путем создания новых композиций сплавов, либо разработкой новых высокоэффективных термомеханических способов направленного воздействия на структуру серийных промышленных сплавов.

Возможности легирования к настоящему времени во многом уже исчерпаны. Кроме того, разработка совершенно новых сплавов требует больших материальных затрат по созданию новых композиций, их сертификации и внедрению. Между тем в последние десятилетия интенсивно развивается новое направление в материаловедении и обработке материалов, заключающееся в формировании в металлах и сплавах ультрадисперсных структурных состояний. Это позволяет резко повысить удельную прочность в области эксплуатационных температур, при этом в области температур обработки давлением существенно повышается технологическая пластичность. На базе этого направления можно создать принципиально новый комплекс физико-химических и механических свойств в обычных промышленных материалах. Это касается субмикроструктурных (СМК) и нанокристаллических (НК) металлов и сплавов, с размером зерен до 0,1 мкм и менее.

Получение материалов с ультрадисперсной структурой на сегодняшний день являет собой сложную технологическую проблему. Наиболее перспективным способом изготовления полуфабрикатов с СМК и НК структурой является деформационно-термическая обработка, включающая интенсивную пластическую деформацию (ИПД), достигаемую обычными методами обработки металлов давлением.

\* Работа проведена в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (договор 13.G25.31.0061), АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2013 годы)» (проект 2.1.2/9277), а также ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (гос. контракт П983).

Можно сформулировать несколько требований к методам интенсивной пластической деформации, которые следует учитывать при их развитии для получения СМК и НК структур в объемных образцах и заготовках:

- однородность по всему объему образца для обеспечения стабильности свойств полученных материалов;

- структуры должны иметь зерна и фрагменты с преимущественно большеугловой разориентировкой, поскольку именно в этом случае происходит качественное изменение свойств материалов;

- образцы не должны иметь несплошности или разрушения, несмотря на их интенсивное деформирование.

Основной задачей технического и технологического управления свойствами и качественными показателями наноструктурированной стали можно

считать повышение стабильности ( $S$ ) процесса деформационного наноструктурирования. Под стабильностью следует понимать обеспечение значений групповых (или единичных) показателей свойств и структурных особенностей обрабатываемой стали ( $K_1, K_2, \dots, K_n$ ) на высоком уровне при некоторых возмущениях параметров состояния

заготовки  $P_l^s$  и параметров управления технологическим процессом  $P_k^u$  [1]. На рисунке 1 представлена функциональная блок-схема управления структурой и свойствами наноструктурированной стали в процессах деформационной обработки.

В предлагаемом подходе к формализации методологии эффективности процесса наноструктурирования стабильность рассматривается как частный случай устойчивости процесса технологического деформирования, что обосновано в работах [1 - 9]. Четкая математическая формулировка такого подхода сформулирована Ляпуновым А.М. в работе [3], а различные трактовки понятия устойчивости и неустойчивости (стабильности и нестабильности) в смысле Ляпунова приведены в работах Вольмира А.С. [4], Болотина В.В. [5], Моисеева Н.Н. [6, 7], Четаева Н.Г. [8, 9] и др.

Алгоритм управления структурой и свойствами стали в процессе деформационного наноструктурирования с помощью технических и технологических групп управления свойствами приведен на рисунке 2.

Следует отметить, что задачи управления структурой и свойствами стали в процессе деформационного наноструктурирования можно класси-

фицировать на оперативное и перспективное управление (см. рисунок 2.). Так, например, при выборе технологической схемы деформационного наноструктурирования решение о выборе способа и режима нагружения принимается после предварительного анализа механических свойств и структурных особенностей стали. В то же время в ходе ведения процесса деформационного наноструктурирования оперативное решение (воздействие на параметры управления технологическим процессом) принимается на основе наблюдаемой ситуа-

ции, например изменение скорости или температуры процесса. То есть, если существует возможность оперативного вмешательства в технологический процесс деформирования, то задача управления структурой и свойствами является задачей оперативного программирования, а если отсутствует - задачей перспективного программирования. В данной постановке задачи рассматриваются аспекты перспективного управления структурой и свойствами в процессах деформационного наноструктурирования.

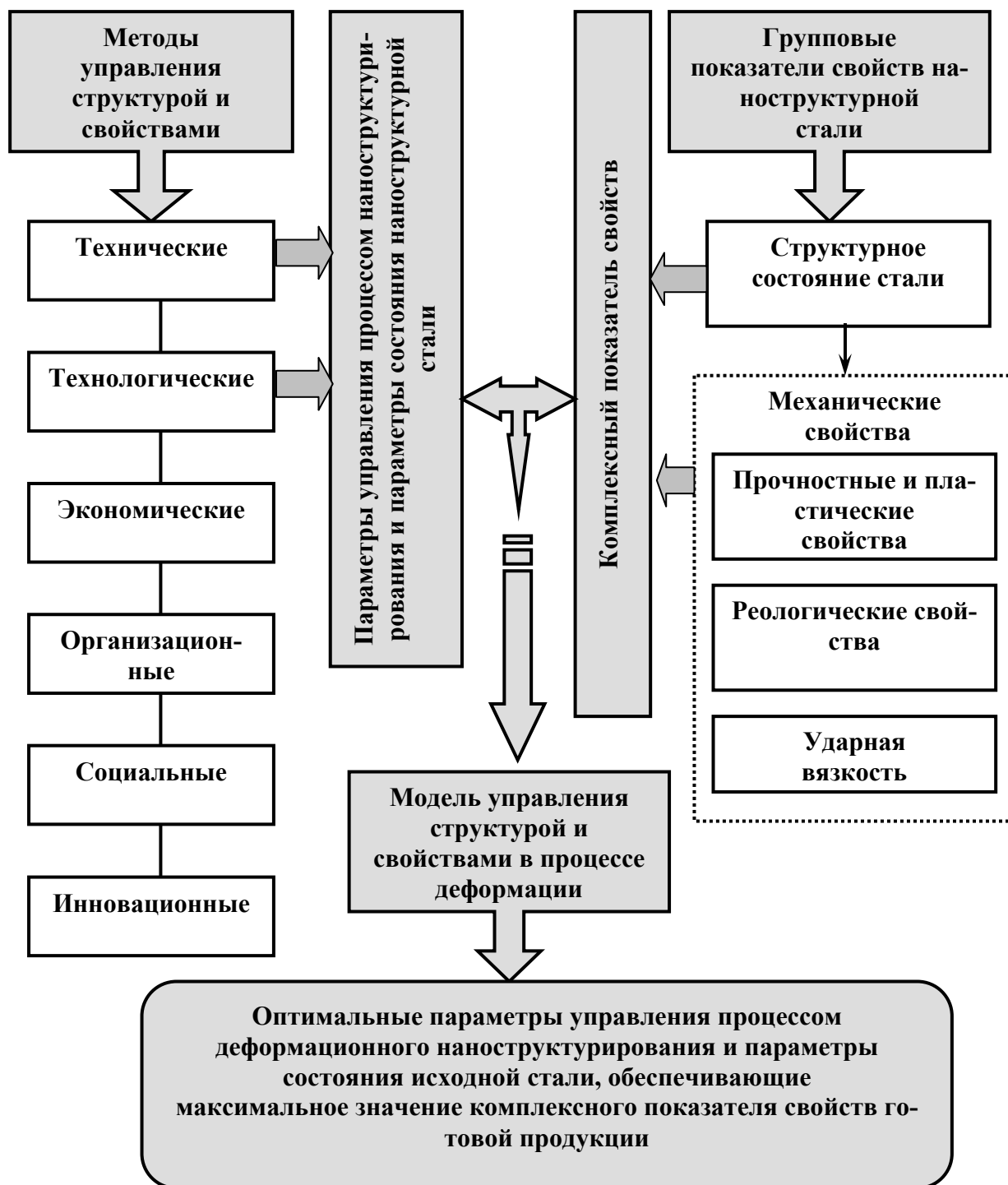


Рис. 1. Функциональная блок-схема управления структурой и свойствами наноструктурированной стали в процессах деформационной обработки



Рис. 2. Алгоритм управления структурой и свойствами стали в процессе деформационного наноструктурирования с помощью технических и технологических групп управления

Потеря стабильности процесса ( $S$ ) может происходить при наступлении случаев отклонения от предельной величины хотя бы одного из показателей структуры и свойств. Например, отсутствие требуемого диапазона размера зерна после окончания операции деформационной обработки (показатель структурных особенностей стали  $K_1$ ) приводит к снижению прочностных и пластических свойств ( $K_3$ ). При этом, даже при выполнении условия соответствия других показателей, например,  $K_2$  (геометрические показатели) или  $K_4$  (показатели специальных свойств) требуемым уровням соответствующих значений, можно считать, что процесс протекает нестабильно.

Используя трактовку авторов В.Д. Ключникова [10] и М.Ю. Дедюкина [11] (в смысле устойчивости по Ляпунову) и вводя принятые обозначения, можно записать следующее формализованное определение стабильности в задаче управления структурой и свойствами в процессах деформационного наноструктурирования.

Стабильность процессов деформационного наноструктурирования, поведение которых характеризуется нормированными показателями структуры и свойств  $K_1, K_2, \dots, K_n$ , с соответствующими коэффициентами весомости  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  состоит в том, что для любого, наперед заданного положительного числа  $\delta$ , найдется положительное число  $\varepsilon$  такое, что если начальные возмущения  $\delta K_1^0, \delta K_2^0, \dots, \delta K_n^0$  заложены в шар радиуса  $\varepsilon$ , то возмущения  $\delta K_1, \delta K_2, \dots, \delta K_n$  во всем последующем движении не покинут трубку радиуса  $\eta$ , т.е. в любой текущий момент времени

$$\lambda_1 (\delta K_1)^2 + \lambda_2 (\delta K_2)^2 + \dots + \lambda_n (\delta K_n)^2 < \eta, \quad (1)$$

если

$$\lambda_1 (\delta K_1^0)^2 + \lambda_2 (\delta K_2^0)^2 + \dots + \lambda_n (\delta K_n^0)^2 < \varepsilon. \quad (2)$$

Если по заданному  $\eta$  такое  $\varepsilon$  не отыщется, то исходное состояние надо признать нестабильным.

Тогда, при заданном устойчивом исходном состоянии мерой стабильности процессов деформационного наноструктурирования можно считать

$$S = \frac{\varepsilon}{\eta} = \frac{\lambda_1 (\delta K_1^0)^2 + \lambda_2 (\delta K_2^0)^2 + \dots + \lambda_n (\delta K_n^0)^2}{\lambda_1 (\delta K_1)^2 + \lambda_2 (\delta K_2)^2 + \dots + \lambda_n (\delta K_n)^2} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i (\delta K_i^0)^2}{\sum_{i=1}^n \lambda_i (\delta K_i)^2}, \quad (3)$$

причем, в данной трактовке если  $S \geq 1$ , процесс можно признать стабильным, а если  $S < 1$ , то нестабильным.

Таким образом, стабильность процессов деформационного наноструктурирования есть отношение суммы квадратов начальных (допустимых) возмущений нормированных значений структуры и свойств обрабатываемой стали с соответствующими весовыми данными показателей к сумме квадратов возмущений нормированных значений структуры и свойств в текущий момент времени также с соответствующими весовыми.

Исходя из приведенного обзора литературы, а также логики постановки и решения краевых задач в обработке металлов давлением, целью которых является оценка эффективности деформационного процесса наноструктурирования, причем, в данном случае под эффективностью процесса наноструктурирования понимается степень изменения механических свойств исследуемого деформационного процесса при обработке конструкционных сталей, можно выделить две группы критериев.

К первой группе следует отнести критерии, характеризующие начальную способность деформируемой стали воспринимать воздействия с точки зрения изменения их механических свойств. Данные критерии будут иметь обозначение  $K_{j,0}^0$ , где нижний индекс « $j$ » – порядковый номер критерия, а верхний – «0», обозначает исходное (не деформированное) состояние материала.

Вторая группа критериев должна характеризовать степень изменения структурных составляющих конструкционной стали в ходе процесса (процессов) деформационной обработки, причем, данные изменения должны однозначно влиять на уровень механических свойств после  $i$ -ой технологической операции. Данные критерии по своей природе характеризуют динамику изменения структурных особенностей стали, приводящих (или возможно приводящих) к возмущению прочностных и пластических свойств. Это дает основание в дальнейшем определить их как динамические критерии, присвоив им верхний индекс « $d$ » ( $K_{il}^d$ ), причем, нижний индекс « $j$ », как и в предыдущем случае, обозначает порядковый номер критерия, а

отношение радиуса шара, ограничивающего начальные возмущения  $\varepsilon$  к радиусу трубки, лимитирующей возмущения показателей качества в текущий момент времени  $\eta$ , т.е.

« $i$ » – номер технологического этапа обработки  $i \in [1, n]$  (при одноэтапной деформации  $i=1$ ).

В ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» на протяжении ряда лет проводится комплекс исследований свойств углеродистых конструкционных сталей при различной степени накопленной деформации при наноструктурировании. В качестве модельных сталей выбраны низкоуглеродистая сталь марки 20 и среднеуглеродистая сталь марки 45. Выбор этих марок стали обусловлен, с одной стороны, их распространенностью и применением для производства широкого спектра метизной продукции, с другой – это стали феррито-перлитного класса, имеющие в микроструктуре как мягкую составляющую (феррит), так и твердую составляющую (цементит). Наглядное представление параметров структуры конструкционных феррито-перлитных сталей иллюстрирует рисунок 3. В качестве процесса наноструктурирования выбрали процесс равноканального углового прессования (РКУП), который достаточно хорошо известен и изучен. Однако данный процесс достаточно эффективен, как правило, для обработки цветных металлов и сплавов на их основе. Для проектирования технологических процессов производства металлоизделий из наноструктурированных сталей необходимо определить критерии эффективности данного вида деформационной обработки для углеродистых сталей и определить ту степень деформации, которая привела бы не только к получению наноструктуры, но и достижению соответствующего уровня механических свойств.

Как показали предыдущие исследования [12 - 16], эффективность изменения механических свойств существенно зависит от исходной структуры ферритокарбидной смеси, а именно от величины межпластинчатого расстояния феррита. Поэтому первый критерий ( $K_1^0$ ) должен количественно характеризовать дисперсность ферритокарбидной смеси и его можно формализовать как отношение толщины ферритной ( $l_\phi^0$ ) и цементитной ( $l_u^0$ ) составляющих в перлите (см. рис. 3 б):

$$K_1^0 = \frac{l_\phi^0}{l_u^0}. \quad (4)$$

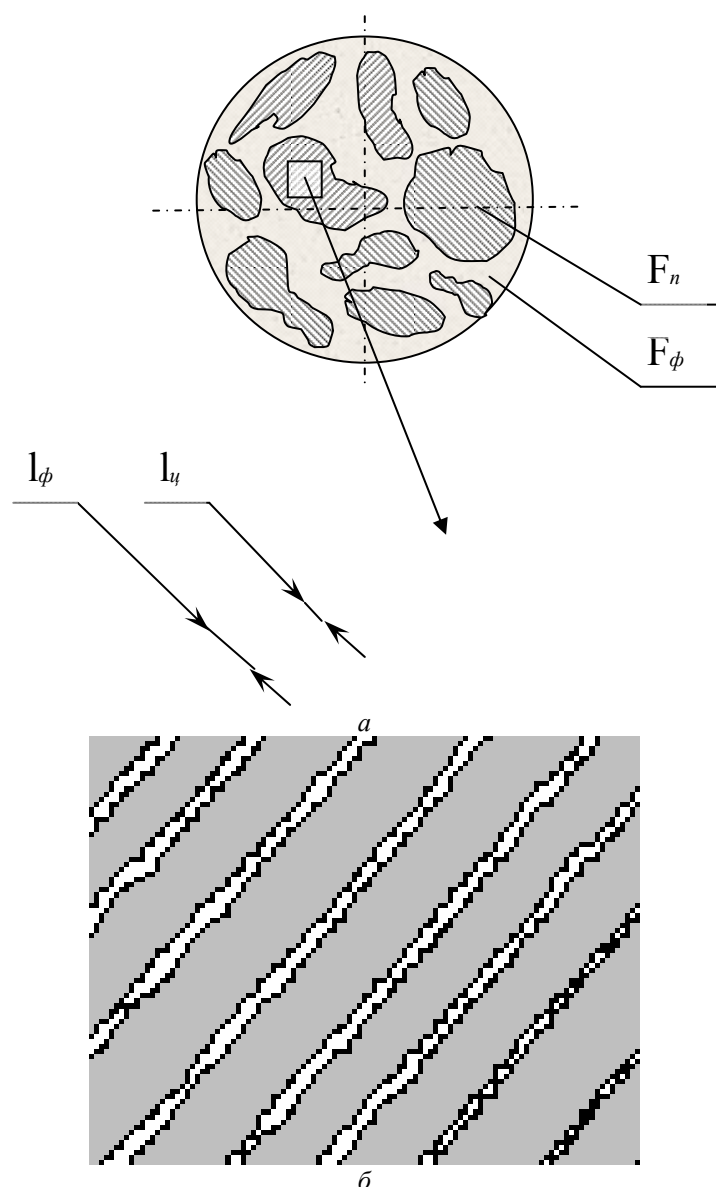


Рис. 3 Схематичное изображение ферритоперлитной (а) и ферритцементитной (б) структуры конструкционных сталей

Физический смысл данного критерия очевиден и не требует дополнительных пояснений. Следует отметить, однако, что увеличение доли ферритной составляющей тонкопластинчатого перлита однозначно приводит к повышению эффективности процесса наноструктурирования (с точки зрения степени изменения механических свойств исследуемого деформационного процесса), поэтому  $K_1^0$  должен стремиться к своему наибольшему значению, т.е.  $K_1^0 \rightarrow \max$ .

Вторым критерием, характеризующим начальную способность деформируемой стали воспринимать воздействия с точки зрения изменения их механических свойств ( $K_2^0$ ), является доля ферритной составляющей. Данный критерий формализуется в виде:

$$K_2^0 = \frac{F_n^0}{F_\phi^0}, \quad (5)$$

где  $F_n^0$  и  $F_\phi^0$  - площади (объемные доли) перлита и феррита в структуре конструкционной стали, соответственно.

Увеличение доли ферритной составляющей в структуре конструкционной стали, как и в рассмотренном ранее случае, однозначно приводит к повышению эффективности процесса наноструктурирования, что накладывает требование максимизации данной количественной оценки степени изменения механических свойств исследуемого деформационного процесса. Поэтому, условием эффективности является  $K_2^0 \rightarrow \max$ .

Благодаря интенсивному диспергированию структурных элементов, РКУП обеспечивает увеличение твердости и прочности в 1,5 - 1,8 раза. При

этом первый проход обеспечивает основное увеличение прочностных характеристик – на 60 - 65%, а последний – всего на 10 - 17%. Это можно объяснить тем, что при первом проходе наблюдается наиболее интенсивное диспергирование феррита: происходит образование деформационных полос практически по всему объему ферритных зерен и начинается фрагментация внутри этих полос, объемная доля которой увеличивается от прохода к проходу. Пластические характеристики существенно снижаются также только при первом проходе – примерно на 30-40 %, оставаясь при последующих проходах практически неизменными.

В связи с этим, можно выделить три критерия, характеризующие динамику изменения структурных особенностей стали, приводящих (или возможно приводящих) к возмущению прочностных и пластических свойств.

Критерий изменения объемной доли фрагментированного феррита полученного в ходе интенсивной пластической деформации (ИПД), например, при РКУП, формализуется как сумма (накопление) от каждой  $i$ -ой деформационной операции изменений (а именно, уменьшения) доли не фрагментированного феррита, приведенной к начальной объемной доли феррита в структуре конструкционной стали. Согласно данному определению рассматриваемый критерий формализуется в виде:

$$K_1^{\partial} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta S_{\phi i}}{S_{\phi 0}}, \quad (6)$$

где  $\Delta S_{\phi i} = S_{\phi 0} - S_{\phi i}$  - абсолютное изменение (уменьшение) доли не фрагментированного феррита по переходам деформационного процесса, причем  $S_{\phi 0}$  и  $S_{\phi i}$  - соответственно, площади (объемные доли) не фрагментированного (исходное состояние) и фрагментированного феррита (после  $i$ -ой деформационной операции) в структуре конструкционной стали.

Уменьшение доли нефрагментированного феррита от каждого предыдущего деформационного перехода к последующему, как следует из приведенных экспериментальных данных, снижает эффективность деформационной операции, по этому, эффективность деформационного воздействия накладывает требование минимизации данного критерия, а именно:  $K_1^{\partial} \rightarrow \min$ .

Вторым динамическим критерием ( $K_2^{\partial}$ ) является степень изменения межпластинчатого расстояния в перлите. По аналогии с критерием  $K_1^{\partial}$ , физический смысл данного показателя эффективности процесса наноструктурирования заключается в сумме (накоплению) от каждой  $i$ -ой деформационной операции изменений (а именно, уменьшения) межпластинчатого расстояния в перлите, приведенной к начальному межпластинчатому рас-

стоянию в структуре конструкционной стали. Тогда,

$$K_2^{\partial} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta l_{\phi i}}{l_{\phi 0}}, \quad (7)$$

где  $\Delta l_{\phi i} = l_{\phi 0} - l_{\phi i}$  - абсолютное изменение (уменьшение) межпластинчатого расстояния в перлите, по переходам деформационного процесса, причем  $l_{\phi 0}$  и  $l_{\phi i}$  - толщина ферритной составляющей в перлите в исходном состоянии и толщина ферритной составляющей в деформированном перлите (после  $i$ -ой деформационной операции) в структуре конструкционной стали, соответственно.

Следует отметить, что формализованная запись данного критерия не изменится, в случае рассмотрения не пластинчатого, а сфероидизированного цементита. В этом случае величины  $l_{\phi 0}$  и  $l_{\phi i}$  будут представлять собой расстояния между соседними сфероидизированными карбидами.

Уменьшение межпластинчатого расстояния в перлите, по переходам деформационного процесса, как следует из приведенных экспериментальных данных, снижает эффективность деформационной операции, по этому, эффективность деформационного воздействия накладывает требование минимизации данного критерия, а именно:  $K_2^{\partial} \rightarrow \min$ .

Третьим динамическим критерием ( $K_3^{\partial}$ ) является изменение объемной доли деформационных полос в структуре конструкционных сталей при ИПД. Используя разработанный принцип определения эффективности процесса деформационного наноструктурирования определением данного критерия можно считать сумму (накопление) от каждой  $i$ -ой деформационной операции изменений (а именно, увеличения) объемной доли деформационных полос в феррите, приведенной к конечному значению объемной доли деформационных полос в структуре конструкционной стали. В данном случае абсолютное увеличение объемной доли деформационных полос в феррите  $\Delta S_{\partial i}$  по переходам деформационного процесса может быть представлено в виде  $\Delta S_{\partial i} = S_{\partial i} - S_{\partial 0}$ , где  $S_{\partial 0}$  и  $S_{\partial i}$  - соответственно, площади (объемные доли) феррита без деформационных полос (исходное состояние) и феррита с деформационными полосами после  $i$ -ой деформационной операции в структуре конструкционной стали.

Используя данные обозначения, формализованное представление критерия изменения объемной доли деформационных полос в структуре конструкционных сталей может быть представлено в виде:

$$K_3^{\partial} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta S_{\partial i}}{S_{\partial i}}. \quad (8)$$

В отличие приведенных ранее динамических критериев эффективности процесса наноструктурирования, в записи  $K_3^o$  в знаменателе находится величина  $S_{di}$ , что предотвращает возникновение математической неопределенности, связанной с делением на ноль в случае, приведения к начальной доли деформационных полос в недеформированной стали. Эффективность деформацион-

ного воздействия для данного критерия запишется условием  $K_3^o \rightarrow \min$

Обобщая полученные результаты по разработке критериального подхода к процессам ИПД при оценке эффективности деформирования конструкционных сталей была предложена и разработана схема, представленная на рис. 4.

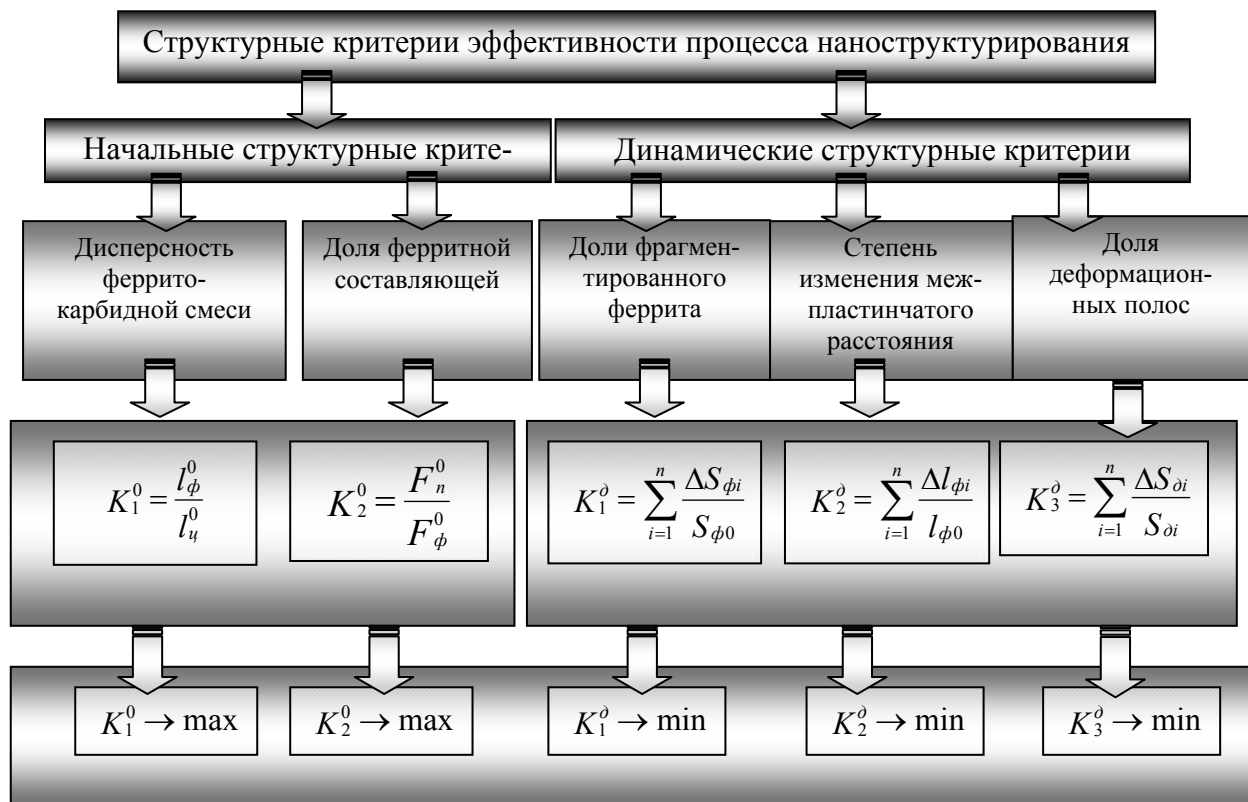


Рис. 4. Схема критериальной оценки эффективности процесса деформационной обработки конструкционных сталей

### Заключение

В настоящее время не существует фиксированного значения степени деформации, достижение которого позволяет исследователям отнести какой-либо процесс к «процессу интенсивной пластической деформации». Ситуация осложняется тем, что в процессах ИПД поперечные размеры заготовок обычно не изменяются, и традиционные методы расчета достигнутой степени деформации неприменимы. Разработанная критериальная оценка позволяет оценить эффективность процесса деформационного наноструктурирования углеродистых конструкционных сталей феррито-перлитного класса.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чукин М.В. Развитие теории и оптимизация процессов технологического и эксплуатационного деформирования изделий с покрытиями.

Дисс. на соискание уч. ст. докт. техн. наук. Магнитогорск. 2001.

2. Чукин М.В. Постановка задачи стохастической оптимизации процессов деформирования объектов с покрытиями // Обработка сплошных и слоистых материалов: Межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ. 2001. С. 195 - 201.

3. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. М.: Гостехиздат, 1950. 153 с.

4. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967. 984с.

5. Болотин В.В. Неконсервативная задача упругой устойчивости. М.: Физматгиз, 1961. 339 с.

6. Моисеев Н.Н., Чванилов Ю.П., Столярова Е.М. Методы оптимизации. М.: Наука, 1978. 352 с.

7. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1971. 48 с.

8. Четаев Н.Г. Устойчивость движения. М.: Наука, 1990. 176 с.

9. Четаев Н.Г. О неустойчивом равновесии, когда силовая функция не есть максимум //

Ученые записки Казанского университета, 1938. N 9. С. 18 - 22.

10. Ключников В.Д. Проблемы неупругой устойчивости // Нерешенные задачи механики и прикладной математики. М.: МГУ, 1977. С. 86 - 91.

11. Дедюкин М.Ю., Крысько В.А. О критерии динамической потери устойчивости // Прикладная механика. Киев, 1994. N 10. С. 56 - 60.

12. Гун Г.С., Чукин М.В., Емалеева Д.Г., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Барышников М.П. Исследование формирования субмикроструктурной структуры поверхностного слоя стальной проволоки с целью повышения уровня ее механических свойств // Вестник МГТУ. 2007. № 3. С. 84 - 86.

13. Чукин М.В., Валиев Р.З., Рааб Г.И., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю. Исследование эволюции структуры наносталей 20 и 45 при критических степенях пластической деформации // Вестник МГТУ. 2007. № 4. С. 89 - 94.

14. Чукин М.В., Копцева Н.В., Валиев Р.З., Яковлева И.Л., Zrník G., Covarik T. Дифракционный электронно-микроскопический анализ субмикрористаллической и нанокристаллической структуры конструкционных углеродистых сталей после равноканального углового прессования и последующего деформирования // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2008. № 1. С. 31 - 37.

15. Чукин М.В., Полякова М.А., Барышников М.П. Особенности реологических свойств углеродистых конструкционных сталей марок 20 и 45 с объемной наноструктурой // Проблемы черной металлургии и материаловедения. ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина». 2009. №2. С. 85 - 92.

16. Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Чукин М.В., Полякова М.А. Влияние предварительной термической обработки на структуру и свойства углеродистых конструкционных сталей 20 и 45, наноструктурированных методом равноканального углового прессования // Черные металлы. 2010. № 7. С. 14 - 19.